

粒子群优化的多群蚂蚁算法

喻学才^{1,2}, 张田文¹

(1. 哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001, yuxuecai@zjnu.cn;

2. 浙江师范大学 交通学院, 浙江 金华 321004)

摘要: 设计多蚁群算法的关键是群间的信息交换规则. 利用粒子群优化中粒子移动的基本思想研究了蚁群间信息交换的新规则, 定义了新的多蚁群优化算法. 新算法的信息交换所占用的数据通信量要远低于现有的信息交换方法. 将新算法用于求解带时间窗的车辆路由问题并和以前的最好的多蚁群算法做比较, 计算结果表明: 新算法的性能超过了已有的方法. 采用群体智能中个体的移动思想来设计群间信息交换规则能改进多蚁群算法的求解性能.

关键词: 蚁群优化; 粒子群优化; 带时间窗的车辆路由问题

中图分类号: TP18

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)05-0766-04

Multiple colony ant algorithm based on particle swarm optimization

YU Xue-Cai^{1,2}, ZHANG Tian-wen¹

(1. School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, yuxuecai@zjnu.cn;

2. Transportation College, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: This work suggested a new multi-ACO algorithm by introducing the basic idea in the particle swarm optimization (PSO) into solution information exchange between ant colonies. The new algorithm takes much less cost for exchanging solution information than those existing methods. The new algorithm was used to solve the VRPTW benchmark instances and was compared with one existing algorithm. The results show that the new algorithm outperforms the existing methods. Exploiting the idea of individual moving in the swarm intelligence to design the rule of information exchange between ant colonies can improve the performance of multi-ACO algorithm.

Key words: ant colony optimization; particle swarm optimization; vehicle routing problem with time windows

蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO)是一种广泛应用于各种困难组合优化问题求解的元启发式方法^[1]. 将蚁群分成若干组能改进ACO的求解能力, 且更易于实现并行化^[2-4]. 多群ACO算法的分组关键技术是蚁群组间的信息交换规则的设计. 本文将粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)^[5]中的粒子移动的基本思想引入多群蚁群算法中群之间的信息交换, 从而开发出新的多群蚁群算法.

1 带时间窗约束的车辆路由问题

VRPTW^[6]可用图论的术语叙述为: 设图 $G =$

$(V, E), V = \{0, 1, \dots, n\}$ 为顶点集合, 代表中心仓库0和 n 个客户; $E = \{e_{ij}, i, j = 0, 1, \dots, n\}$ 为全连接图 G 的边集, 代表中心仓库0与 n 个客户之间或客户与客户的距离 e_{ij} (也可对应车辆从客户 i 到达客户 j 的时间 t_{ij}). 每个顶点附有一个需求量 q_i 、服务时间 s_i 和一个服务时间窗 $[e_i, l_i]$, 其中, e_0, l_0 分别为每辆车从中心仓库0出发的最早时间及返回中心仓库0的最晚时间, $e_i, l_i (i \in V - \{0\})$ 分别为客户 i 开始接受服务的最早时间和最晚时间, $q_0 = 0, s_0 = 0$. 每辆车的容量都为 Q . 设一个VRPTW实例的一个可行解 T 使用 v 辆车, 则 T 由 v 段行车路线组成, 其中, 每辆车 h 必须满足客户接受服务的时间窗要求. 设 $C_0^h (\geq e_0)$ 为车辆 h 从中心仓库0出发的时间, 到达客户 $i_{hj} (1 \leq j \leq m_h)$ 的时间 $C_{i_{hj}}^h = \max\{C_{i_{h(j-1)}}^h + s_{i_{h(j-1)}} + t_{i_{h(j-1)}i_{hj}}, e_{i_{hj}}\}$

收稿日期: 2009-01-10.

作者简介: 喻学才 (1975—), 男, 博士, 讲师;

张田文 (1940—), 男, 教授, 博士生导师.

(如果车提前到达客户 i_{hj} 则必须等待) 必须不超过 l_{ij} 且 $C_{i_{hj}}^h + s_{i_{hj}} + t_{i_{hj}0}$ 不超过 l_0 . 所需的车辆数目 v 最小是 VRPTW 的主要优化目标,另一个是次要目标.

2 VRPTW 的单群 ACO 算法

蚁群的每只蚂蚁 k 构造 VRPTW 的一个可行解. 首先,蚂蚁 k 从中心仓库 0 出发,选择满足问

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } j = \operatorname{argmax}_{u \in J(T^k(t))} \{ \tau_{iu}^k(t) [\eta_{iu}^k(t)]^\beta \}, j \in J(T^k(t)), \bar{q} \leq \bar{q}_0; \\ \frac{\tau_{ij}^k(t) [\eta_{ij}^k(t)]^\beta}{\sum_{u \in J(T^k(t))} \tau_{iu}^k(t) [\eta_{iu}^k(t)]^\beta}, & \text{if } j \in J(T^k(t)), \bar{q} > \bar{q}_0; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $p_{ij}^k(t)$ 为蚂蚁 k 在迭代步 t 服务完客户 i 之后选择客户 j 为下一个服务对象的概率. $T^k(t)$ 为蚂蚁 k 在迭代步 t 正在构建的部分解, $J(T^k(t))$ 为该部分解仍未提供服务的客户的集合. $\tau_{ij} \in \tau$ 为顶点 i 与顶点 j 的连接边 e_{ij} 对应的信息素值. 由于蚂蚁经过边 e_{ij} 时,会对其对应的信息素值进行局部更新,所以蚂蚁 k 在迭代步 t 时边 e_{ij} 对应的信息素值 τ_{ij} 会变化. η_{ij} 为顶点 i 与顶点 j 的连接边 e_{ij} 的启发式信息. 设 $W_{ij} = C_j - (C_i + s_i)$ 为到达客户 j 与服务完客户 i 之间的时间差, $U_{ij} = l_j - (C_i + s_i)$ 为客户 j 要求服务的紧迫性,则信息素值 η_{ij} 定义为 $\eta_{ij} = 1/(W_{ij}U_{ij})$. 注意到 C_i 是一个与蚂蚁 k 正构造的部分解相关的变量. 这个定义实际上是说时间差越小,紧迫性越高的客户应该被优先服务. $\bar{q}$ 为一个 $[0,1]$ 区间上均匀分布的随机数, $\bar{q}_0$ 为式(1)中平衡使用与探索的选择阈值.

蚂蚁 k 选择顶点 j 加入到其当前构造的部分解 $T^k(t)$ 后,对信息素值 $\tau_{ij}^k(t)$ 进行局部更新.

$$\tau_{ij}^k(t) \leftarrow (1 - \rho) \tau_{ij}^k(t) + \rho \tau_0. \quad (2)$$

式中: ρ 为信息素值的减少率, τ_0 为信息素的初始值. 信息素的初始值与 VRPTW 实例的最近邻算法 (Nearest-Neighbor Algorithm) 最优解的代价相关即 $\tau_0 = 1/(n \times f_c(T^{NN}))$.

一个解的代价:

$$f_c(T) = C_f v + L.$$

式中: L 为所有车辆行程之和, C_f 为一个大到足以偏置两个目标函数值的数.

当所有的蚂蚁构造了一个可行解后,利用从算法开始搜索到的最优解 T^* 对信息素矩阵进行全局更新. 更新规则为

$$\tau_{ij}(t+1) \leftarrow (1 - \rho) \tau_{ij}(t) + \rho \Delta \tau, \text{ if } e_{ij} \in T^*. \quad (3)$$

题所有约束的客户作为下一个服务的对象. 如此反复进行,直到一辆车 h 没有可服务的客户为止. 如果还有客户没有被任何一辆车服务,则蚂蚁 k 新增加一辆车,重复上述的构造过程,直到所有的客户都恰好被一辆车提供了一次运输服务为止. 设蚂蚁 k 当前服务的客服为 i ,则根据规则概率地选择从未被任何一辆车服务的客户 j 作为下一个服务对象.

式中: $\Delta \tau = 1/f_c(T^*)$. 注意到 $f_c(T^*) \leq f_c(T^{NN})$, 所以 $\Delta \tau > \tau_0$.

一个蚁群求解 VRPTW 的算法描述为:

算法 1 求解 VRPTW 的单 ACO 算法 (Vrptw-sAco).

输入 实例: 位置, 时间窗, 服务时间, 需求量, 车辆容量, 最大迭代步 N_t , 蚂蚁数 N_a , q_0

输出 搜索到的实例的最优解 T^*

S1 计算顶点间距离;

S2 根据 η_{ij} 用最近邻 (Near-Neighbor) 算法求 T^{NN} ;

S3 初始化信息素矩阵 τ ;

S4 初始化全局最好解 $T^* \leftarrow T^{NN}$;

S5 初始化迭代计数器 $t \leftarrow 0$;

S6 while $t \leq N_t$

S7 for 每只蚂蚁 $k = 1, \dots, N_a$

S8 $T^k(t) \leftarrow 0, J(T^k(t)) \leftarrow V - \{0\}, i \leftarrow 0$;

S9 while $J(T^k(t)) \neq \phi$

S10 根据式(1)选择一个顶点 $j \in J(T^k(t))$;

S11 $T^k(t) \leftarrow T^k(t) \cup \{j\}, J(T^k(t)) \leftarrow J(T^k(t)) - \{j\}$;

S12 根据式(2)更新信息素值 $\tau_{ij}^k(t)$;

S13 $i \leftarrow j$;

S14 $T^b \leftarrow \operatorname{argmin}_{T^k(t)} \{f_c(T^k(t)) : k = 1, \dots, N_a\}$;

S15 if $f_c(T^*) > f_c(T^b)$

S16 $T^* \leftarrow T^b$;

S17 根据式(3)利用 T^* 更新信息素矩阵 $\tau(t)$;

S18 $t \leftarrow t + 1$;

3 VRPTW 的多群 ACO 算法

多群 ACO 求解 VRPTW 实例是在单群算法的基础上直接构建的. 具体地说, 每个蚁群仍像单群一样求解 VRPTW, 然后每隔一定的迭代步数之后, 群间交换积累的搜索信息. 不同的多群 ACO 算法的区别在于群之间交换信息的差别. 本文构造的多群 ACO 算法即将 PSO 中位置点移动的思想应用于群间信息的交换.

算法 2 求解 VRPTW 的多群 ACO 算法 (Vrptw - DAcO).

输入 实例: 位置, 时间窗, 服务时间, 需求量, 车辆容量, 最大迭代步 N_t , 蚂蚁数 N_a, q_0 , 群数 N_c .

- 输出** 搜索到的实例的最优解 T^*
- S01 计算顶点间距离;
 - S02 根据 η_{ij} 用最近邻 (Near-Neighbor) 算法求 T^{NN} ;
 - S03 初始化每个群的信息素矩阵 τ , 最好解 $\bar{T}^* \leftarrow T^{NN}$;
 - S04 初始化全局最好解 $T^* \leftarrow T^{NN}$;
 - S05 初始化迭代计数器 $t \leftarrow 0$;
 - S06 while $t \leq N_t$
 - S07 for 并行地执行每个群 $c = 1 \rightarrow N_c$
 - S08 执行算法 1;
 - S09 if $0 = t \bmod I_c$
 - S10 调用信息交换模块 EXHG;

算法 2 中的信息交换模块 EXHG 可以有很多种设计方案. 其中效果很好的一种是群两两之间交换最好解, 即 EXHGIB. 例如, 设群 $N_c = 4$, 分别记为 c_1, c_2, c_3, c_4 . 当交换信息模块被执行时, c_1 的最好解 T_1^b 发送给 c_2, c_3, c_4 , 类似地, c_2 的最优解 T_2^b 发送给 c_1, c_3, c_4 等等. 信息交换之后, 每个群都有 4 个最优解 $T_1^b, T_2^b, T_3^b, T_4^b$. 这些最优解被用于每个群的信息素矩阵的更新. 所有最好解的代价的平均值 f_c^{avg} 定义为 $f_c^{avg} = \sum_{i=1}^{N_c} f_c(T_i^b) / N_c$. 最优解更新信息素矩阵的权重 $\omega^h (h = 1 \rightarrow N_c)$ 为

$$\omega^h = \begin{cases} \frac{f_c^{avg} - f_c(T_h^b)}{f_c^{avg} - f_c(T^*)} & \text{if } f_c^{avg} > f_c(T_h^b) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}.$$

最优解更新信息素矩阵的规则为

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij} + \frac{\rho\omega^h}{f_c(T_h^b)}, \text{ if } e_{ij} \in T_h^b. \quad (4)$$

将 PSO 中粒子移动的基本思想引入群之间的信息交换可以设计一种新颖的交换信息模块,

即称之为 EXHGPSO. 将多蚁群中的群对应为 PSO 中的粒子, 根据文献[2], EXHGPSO 的目的就是使群搜索向自算法开始的最好解 T^* 和群自己的最好解 T_h^b 移动. 为此需要使用两个最好解 T^* 和 T_h^b 更新群 h 的信息素. 给每个最优解向信息素矩阵更新的增加值加以权衡 $\vec{\varepsilon}_h^b$, 其维数等于对应解 T_h^b 的长度, 每个分量 $\omega_j \sim U(0, 1)$. 更新规则为

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij} + \frac{\rho\omega_j}{f_c(T^*)}, \text{ if } e_{ij} \in T^* \in \{T_h^b, T^*\}. \quad (5)$$

从数据通信量的角度看, 两种信息交换模块中, 一般情况下, EXHGPSO 占用的通信资源较少. 蚁群之间要交换信息: 1) 需要将各个群的最好解的代价发送到某个群; 2) 比较其大小; 3) 根据交换规则, 由某些群向另一些群发送最好解的信息. 就 EXHGIB 而言, 注意到在相同的迭代步, 各个蚁群构造的解的代价不会相差太远, 可以假设最好解代价低于平均代价的解为蚁群数的一半. 这样, 平均而言, 有 $N_c/2$ 的蚁群会向除自身外的每个群发送其最好解的信息. 整体看, 解信息的发送次数为 $N_c(N_c - 1)/2$. 除了解信息外, EXHGIB 还需要发送每个群最好解相应的更新信息素权重, 但与发送解相比, 通信量则小了许多, 可以忽略不计. 再看 EXHGPSO, 在知道拥有最低代价的最好解的群之后, 只需该群向其它每个群发送最好解的信息即可. 整体看, 发送次数为 $N_c - 1$. 所以 EXHGPSO 在并行运行时具有很大的优势, 特别是在问题规模很大, 解长度很长的情况下更适用.

从信息素更新的复杂性来看, EXHGPSO 交换模块下的每个群需要两个解更新; 而 EXHGIB 平均需要 $N_c/2$ 个. 所以 EXHGPSO 交换模块下的每个群更新信息素模块的计算量最低.

4 试 验

为了比较两种交换模块下的多蚁群算法求解 VRPTW 问题的性能, 用 C++ 语言实现了这些算法并在 Solomon 标准测试算例上执行.

表 1 报告每个小组的平均车辆数、平均路由长度和群间信息交换耗用的时间. 试验参数设置为: $\beta = 2, \rho = 0.1, \tilde{q}_0 = 0.9$. 每群蚂蚁数为 10, 群数为 8. 最大迭代步数为 1 500. 这些参数是根据大量试验结果进行设置, 也有可能存在更好的设置. 每个单群算法在局域网的一个节点上运行, 局域网的实际平均带宽为 83.6 Mbps.

表 1 显示, 两种信息交换模块 EXHGIB 和

EXHGPSO 下的多蚁群算法求解主目标函数的能力在大多数算例组上相同,仅在组 R 上基于 EXHGPSO 模块的多蚁群算法稍有优势. 另一方面,基于模块 EXHGIB 的多蚁群算法求解次目标函数的优化能力所有算例组上比新算法有较为明显的优势. 但是,当与局部优化结合时,新算法求解次

目标函数能力比较弱的问题能得到充分的解决. 再考虑到 EXHGPSO 比 EXHGIB 少得多的信息交换量(从表 1 中的时间上可知,EXHGIB 用于信息交换耗用的时间比 EXHGPSO 要大一个数量级),基于 EXHGPSO 设计多群蚁群优化应该是一个好的选择.

表 1 两种多群 ACO 求解 VRPTW 的性能比较

组名	EXHGIB			EXHGPSO			组名	EXHGIB			EXHGPSO		
	V	L	T	V	L	T		V	L	T	V	L	T
C1	10	901	0.12	10	928	0.08	CR2	3.4	1 431	0.14	3.4	1 488	0.05
C2	3	624	0.11	3	664	0.05	R1	13	1 368	0.18	12.8	1 430	0.04
CR1	12.5	1 511	0.15	12.5	1 577	0.08	R2	3.01	1 222	0.15	3	1 280	0.04

5 结 论

1) 引入粒子群优化(PSO)中粒子移动的思想到多蚁群算法的群间信息交换设计中,得到了新的多蚁群算法.

2) 新算法的交换数据量远低于目前的方法. 而且在带时间窗约束的车辆路由问题上的计算结果显示,新方法的求解性能优于原来的方法.

参考文献:

[1] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B, 1996, 26(1): 29-41.

[2] ELLABIB I, CALAMAI P, BASIR O. Exchange strategies for multiple ant colony system [J]. Information Sci-

ences, 2007, 177(5): 1248-1264.

[3] MIDDENDORF M, REISCHLE F, SCHMECK H. Multi colony ant algorithms [J]. Journal of Heuristics, 2002, 8(3): 305-320.

[4] CHU S C, RODDICK J F, PAN J S. Ant colony system with communication strategies [J]. Information Sciences, 2004, 167 (1/4): 63-76.

[5] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]//In: Neural Networks. Nagoya: IEEE International Conference on Proceedings, 1995: 1942-1948.

[6] GAMBARDILLA L M, TAILLARD E, AGAZZI G. MACS-VRPTW: A multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows [C]//In: New Ideas in Optimization. London: Advanced Topics In Computer Science Series, 1999: 63-76.

(编辑 张 红)

(上接第 765 页)

面温度都远远低于保证辐射管不烧损的安全温度,不会发生辐射管烧损的现象.

2) 以辐射管壁面温度的高低和分布的均匀性为主要选择因素,在测试负荷范围内,219 mm 是比较合适的辐射管管径选择;以火筒表面热流密度分布前后两热流密度峰值相等为最佳的原则, Φ 219 辐射管在 50,75,100 kW 三种负荷下,比较合适的管长分别为 950,1 000,1 100 mm 左右;

3) 在实际应用中选择辐射管管径、管长时,可根据加热炉实际尺寸和上述实验得到的相对合适的配比关系进行选择. 但必须注意的是,当实际运行时的炉膛截面热负荷、风速等条件与实验情况有较大差异时,需要对选择结果进行相应的修正.

参考文献:

[1] 马卫国,孙洪钰,冯定. 油田用加热炉技术现状与发

展方向[J]. 石油机械, 2006, 34(10): 70-71.

[2] 尹钟万,阙连胜. 油田加热炉[J]. 油田地面工程, 1984,3(3):72-84.

[3] 梁庚,高仲龙,温治. 工业炉用燃烧装置[J]. 工业加热,1997(4):3-5.

[4] 刘新丰. 我国燃料炉燃烧装置的现状与发展方向[J]. 工业炉,1995(2):47-50.

[5] 肖永胜,陈忠喜,李玉文. 加热炉防烧损技术研究[J]. 油田地面工程,2003, 23(5): 72-73.

[6] 冀红. 加热炉炉管防烧损技术研究[J]. 中国设备工程, 2006 (8): 39-40.

[7] 黄思明. 国外全自动燃油燃气燃烧机现状及发展趋势[J]. 热能动力工程, 2001 (9): 467-471.

[8] 彭好义. 新型辐射管燃烧技术的研究报告[R]. 长沙:中南大学应用物理与热能工程系, 2001.

[9] 谢辰,黄德轩,周勇. 辐射管加热炉的优劣化分析[J]. 四川冶金,2000 (6):28-30.

[10] 高仲龙,蒋大强. 带钢加热用辐射管[J]. 工业加热, 1998 (5):9-11.

(编辑 杨 波)